

УДК 621.793.620.172

INFLUENCE OF PHYSICAL FIELDS ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF MATERIALS OF LOW-RESOURCE PARTS

O. Osmak, A. Bashta, S. Blazhenko*National University of Food Technologies*

Key words:

surface layer of the material,
physical field,
residual stress,
hardened surfacing,
fatigue limit state

Article history:

Received 20.03.2024

Received in revised form
10.04.2024

Accepted 12.04.2024

Corresponding author:

ingmex@ukr.net

ABSTRACT

An important scientific and applied task is to solve the problem of extending the service life of low-resource parts of machines and devices in the production and processing food industry. The paper examines the influence of a number of physical fields on the mechanical characteristics of the surface layers of structural materials. Improving the strength characteristics of working surfaces, especially low-resource parts, by processing them with certain physical fields, namely of laser, radiation and acoustic origin, makes it possible to significantly influence the structure of materials, obtaining their general cross-sectional heterogeneity, to modify and significantly extend the terms of their use in production. The purpose of the work is to determine the influence of the indicated physical fields on such strength characteristics as fatigue, hardness and wear resistance of the studied materials. It was established that the influence of the specified physical fields leads to significant changes in the physical, mechanical and structural characteristics of materials. Laser processing of the near-surface layers of most of the studied materials negatively affects their fatigue characteristics under significant amounts of operating loads. The combined processing of the surface of materials by the physical fields of laser radiation and laser-acoustic irradiation allows, due to the change of structural characteristics, for homogeneous materials in the entire range of repetitively variable stresses, and for "complex" alloys — in the zone of stresses close to the fatigue limit, to significantly increase them endurance, wear resistance and corrosion resistance. Increasing the wear resistance, corrosion resistance and durability of the working surface of the material of problem parts significantly extends their service life. The operation of equipment with reinforced working surfaces of parts shows that their mass use in production will make it possible to significantly reduce the duration and labor intensity of repair work, increase the service life of the equipment itself, and this, in turn, will significantly increase the efficiency and profitability of production.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-3

ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛІВ МАЛОРЕСУРСНИХ ДЕТАЛЕЙ

О. О. Осьмак, <https://orcid.org/0000-0002-6066-6555>

А. В. Башта, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0009-0005-8383-1700>

С. І. Блаженко, канд. техн. наук, <http://orcid.org/0000-0002-9152-4859>

Національний університет харчових технологій

Важливим науково-прикладним завданням є вирішення проблеми подовження терміну експлуатації малоресурсних деталей машин і апаратів виробничої та переробної харчової промисловості. У статті представлено результати досліджень впливу фізичних полів на механічні характеристики поверхневих шарів конструкційних матеріалів. Підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та витривалості робочої поверхні матеріалу проблемних деталей у подальшому дасть змогу суттєво продовжити їх експлуатаційний ресурс.

Ключові слова: *поверхневий шар матеріалу, фізичне поле, залишкові напруження, зміцнюючі покриття, границя втоми.*

Вступ. Значне підвищення вартості легуючих матеріалів і фактична відсутність більшості з них в Україні вимагають шукати шляхи вирішення проблем покращення характеристик міцності металів, які застосовуються в процесі проєктування та виготовлення деталей машин та апаратів у сучасних харчових виробництвах. Розробка й створення нових матеріалів потребує значних матеріальних і технологічних затрат, а також довготривалих досліджень з визначення їх фізико-механічних характеристик. Модифікація ж широкоживаних і добре відомих металів, що використовуються при виготовленні тих чи інших конструкційних елементів, під конкретні потреби промисловості є значно перспективнішим вирішенням цих проблем.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Поліпшення характеристик міцності робочих поверхонь, особливо малоресурсних деталей, шляхом обробки їх певними фізичними полями, а саме лазерного, радіаційного та акустичного опромінення, надає можливість суттєво змінювати структуру матеріалів, отримуючи їх загальну неоднорідність по поперечному перерізу, модифікувати і значно продовжити терміни використання їх у виробництві [1—5].

Мета статті: визначення впливу вказаних фізичних полів на такі характеристики міцності, як втома, твердість і зносостійкість матеріалів, що досліджувалися.

Матеріали і методи. Експериментальні дослідження з визначення характеристик міцності матеріалів проводилися на зразках, виготовлених із пружинної сталі 65Г, титану литого ТЛ5 і тугоплавких вольфрам-титанових сплавів ВТ8 і ВТ10, робочі зони яких піддавались обробці вказаними вище полями.

Модернізована випробувальна установка ЧКЗ-1, силовий блок якої приведено на рис. 1 (розроблена Інститутом проблем міцності ім. Г. С. Писаренка, НАНУ), дає змогу експериментально досліджувати зразки на втому під час чистого кругового згину за нормальних температурних режимів.

Особливістю вузла навантаження є не лише широкий діапазон амплітуд повторно-змінних напружень (100 Па—880 МПа), але й висока точність задання та підтримання навантаження в робочій зоні зразка. Відносна похибка визначення амплітуд повторно-змінних навантажень не перевищує 1,5% за частоти коливань в діапазоні 10÷120 Гц.

Випробування здійснювали на подібних до галтелі зразках круглого поперечного

перерізу довжиною робочої зони 140 мм (рис. 2), а також на зразках круглого поперечного перерізу з концентратором конічної форми в його робочій зоні (рис. 3, в).

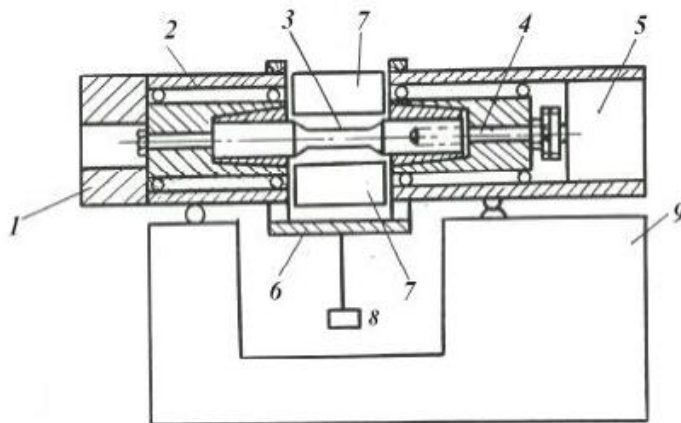


Рис. 1. Схема силового вузла установки ЧКЗ-1: 1—7 — вузол циклічного навантаження і система контролю; 3 — зразок, що досліджується; 8 — набір змінних ваг; 9 — металева рама

Під час проведення досліджень використовували партію зразків, що ділилася на декілька рівноцінних блоків, які в подальшому підлягали обробленню вказаними фізичними полями.

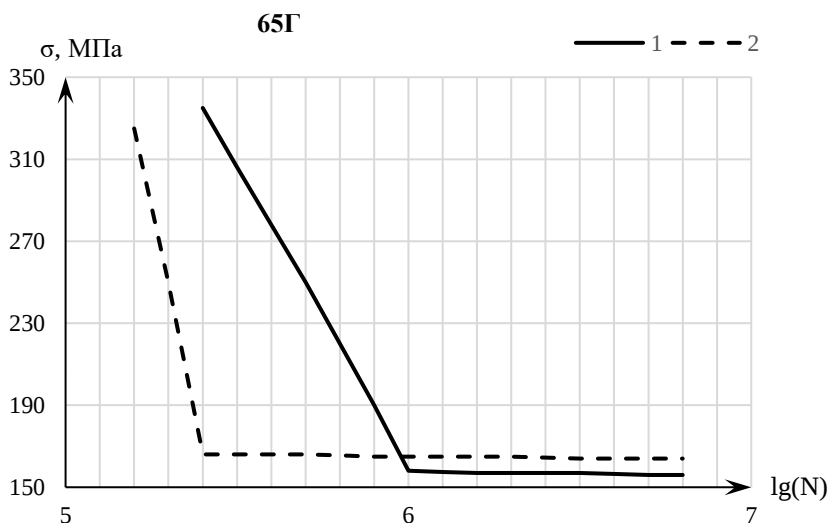


Рис. 2. Криві втоми сталі 65Г: 1 — еталонна; 2 — після лазерного опромінення робочої зони зразка

Експериментальним шляхом визначали час, інтенсивність і рівень впливу фізичного поля та їх комбінацій на кожну окрему партію зразків. Результати досліджень порівнювали з даними еталонної (необробленої) партії. Під час статистичної обробки результатів досліджень здійснювали розрахунки відносної похибки, порівнюючи їх з нормативними значеннями.

Після лазерної, радіаційної або акустичної обробки зразків, виготовлених із вказаних вище матеріалів, проводилося визначення характеристик міцності їх композитної структури.

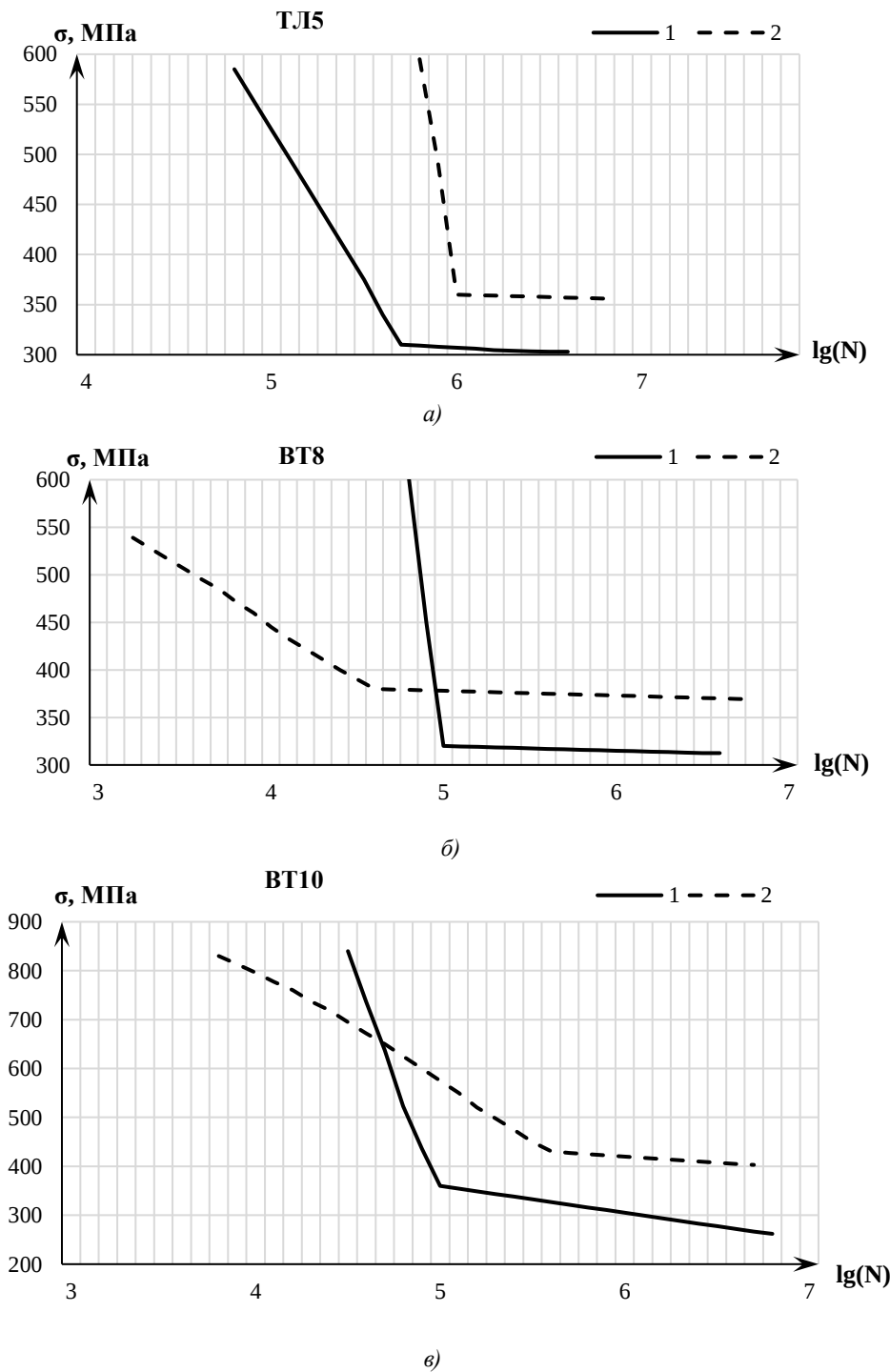


Рис. 3. Криві втоми металів, що досліджувалися: а) ТЛ5: 1 — еталонна; 2 — лазер-акустичне опромінення; б) ВТ8: 1 — еталонна; 2 — лазер-радіаційне опромінення; в) ВТ10: 1 — еталонна; 2 — лазер-радіаційне опромінення

Для рівномірного розподілу енергії мілісекундних імпульсів лазерного опромінення по поверхні зразка і для запобігання плавленню металу в локальних місцях використовували епоксидо-полімерне з алюмінієвим порошковим наповнювачем покриття його робочої зони.

Результати досліджень. Аналіз експериментальних даних, а також криві втоми зразків 65Г (рис. 2) дають змогу стверджувати, що після лазерної обробки (крива 2) у поверхневих шарах матеріалу відбувалося крихке руйнування, яке призвело до відчутного зменшення його міцності. Визначено, що в результаті обробки зразків лазерними імпульсами, вони нагрівалися набагато інтенсивніше, якщо порівняти з еталонними зразками.

Загальновідомо, що температура нагрівання зразків під час циклічних навантажень залежить від величини діючих напружень [6, 7] і від швидкості руху вільних дислокацій [8—10]. Тому можна стверджувати, що різке зменшення міцності на втому зразків з 65Г, які піддавалися лазерному опроміненню, відбувалося через появу залишкових напружень у приповерхневих шарах матеріалу внаслідок зміни їх структури.

Аналізуючи отримані дані, можемо стверджувати, що для зразків із цього металу, які загартовані й оброблені лазером, характерним є зниження границі витривалості практично на всьому діапазоні високих значень напружень втоми. У той же час за напружень, близьких до границі витривалості, її величина, якщо порівняти зі значеннями еталонної партії зразків, зростає на 10—15% за рахунок меншого впливу залишкових напружень в обробленим таким чином приповерхневих шарах матеріалу. Дослідження зразків після проведення випробувань підтвердило можливість визначити дві характерні зони їх руйнування: крихка — в приповерхневих шарах, в'язка — в основному тілі металу зразка. Відмічене незначне зниження мікротвердості робочої поверхні зразків, зумовлене виникненням у периферійних шарах певних зон залишкових напружень, викликаних опромінюванням лазером.

Експериментально також встановлено, що комбінована обробка поверхні робочої зони зразків зі сплаву ТЛ5 лазер-акустичним опроміненням, дає змогу досягти суттєвого підвищення витривалості протягом усього діапазону навантажень (рис. 3, а). На відміну від чистого титану, витривалість зразків із вольфрам-титанових сплавів ВТ8 і ВТ10, робоча зона яких оброблена лазер-радіаційним опроміненням (рис. 3, б і 3, в), знижується за високих діючих напружень.

Величина ж границі витривалості при цьому зросла на 12—18% порівняно з даними для зразків у вихідному стані (еталонні партії зразків).

Як і для зразків із сталі 65Г, змінюється сам характер руйнування від втоми зразків з литого титану та його сплавів. Якщо у вихідному стані матеріали руйнувалися з ознаками крихкого руйнування, то після лазер-акустичного і лазер-радіаційного опромінення спостерігалися ознаки пластичного руйнування. В епіцентрах виникнення акустичних хвиль великої амплітуди метал зразка не реагує з кислотою травлення шліфів, а гістограми розподілу мікротвердості на поверхні зразка вказують на її неістотне збільшення. Щільність потужності під час лазерного опромінення становила $P = 1 \cdot 10^9$, Вт/см².

Результати механічних випробувань на втому показують, що в умовах дії симетричних циклічних навантажень комбіноване лазер-радіаційне опромінення робочої поверхні зразків ВТ8 і ВТ10 призводить до суттєвого (18%) підвищення величини границі їх витривалості.

Таке зміцнення зразків відбулося після комбінованої дії — спочатку лазерного

азотування, а потім радіаційного опромінення поверхні. Лазерне азотування зразків проводилося в середовищі рідкого азоту. Промінь лазера, потрапляючи на поверхню зразка, проходить крізь шар рідкого азоту, спричиняє його вибухове випаровування з утворенням нітридів титану в приповерхневих шарах. Тривалість лазерного імпульсу становила $t = 50$ нс. Довжина хвилі та щільність потужності випромінювання складає, відповідно, $\alpha = 1,06$ см і $P = 1 \cdot 10^9$, Вт/см².

За такого методу обробки поверхні зразка мікротвердість титанового сплаву H_V в його приповерхневих шарах зросла від 35 до 38%. Водночас спостерігається падіння міцності зразків за значних величин діючих напружень. Це зумовлене утворенням твердих нітридів титану в приповерхневих шарах, а також утворенням нітридних зерен, що призводить до виникнення далекодіючих полів залишкових напружень, які впливають на зниження міцності.

Подальше радіаційне опромінення азотованої поверхні зразків вказаних сплавів дає змогу суттєво змінювати її структуру і впливати на поля залишкових напружень шляхом подрібнення нітридних зерен. Таким чином, радіаційне опромінення забезпечує зниження впливу величини цих напружень. Отже, лазер-радіаційна обробка поверхні зразка надає можливість не тільки поліпшити його зносостійкість за рахунок зростання твердості нітратних приповерхневих шарів металу, але й помітно зменшити вплив залишкових напружень у цих шарах, подрібнюючи величину самих нітратних зерен. Як наслідок, за напружень, що наближаються до межі витривалості, де вплив залишкових напружень суттєво знижується, її величина збільшується.

Отже, можна стверджувати, що комбінована лазерно-акустична та лазерно-радіаційна обробка деталей, виготовлених з литого титану або вольфрам-титанових сплавів, істотно підвищить опір зношуванню робочих поверхонь і рівень їх витривалості в умовах довготривалої експлуатації.

Особливо актуально це для малоресурсних деталей машин і елементів конструкцій переробного виробництва, де під час їх виготовлення основним матеріалом є не леговані сталі через порівняно невисоку собівартість. Тож головною умовою для підвищення ресурсу експлуатації конструкційних матеріалів є наявність характерної для них досить широкої перехідної дифузійної зони твердого розчину. Така зона надає можливість поєднувати отриману зовнішню зносостійку робочу поверхню з основою, забезпечуючи більш плавну і неперервну зміну властивостей матеріалу конструкційного елементу по висоті його поперечного перерізу, оскільки відсутність такої перехідної зони твердого розчину в умовах знакозмінних навантажень, як показують дослідження, може призводити до руйнування від втоми зміцненого периферійного шару робочої поверхні конструкційного елемента. Цілісність же композитної структури поперечного перерізу матеріалу зразка за рахунок наявності зони твердого розчину між поверхневим зміцненим покриттям і основою дає змогу суттєво подовжити термін експлуатації таких деталей в машинах, апаратах чи відповідних конструкціях.

Контроль якості зносостійкого поверхневого покриття, зазвичай, проводиться металографічними та іншими спеціальними методами. Експлуатація обладнання зі зміцненими робочими поверхнями деталей показує, що їх масове застосування у виробництві дасть змогу скоротити тривалість і трудомісткість ремонтних робіт, збільшить термін експлуатації самого обладнання, а це, у свою чергу, значно підвищить ефективність і рентабельність виробництва.

Висновки. 1. Встановлено, що вплив зазначених фізичних полів призводить до значних змін у фізико-механічних і структурних характеристиках матеріалів.

2. Лазерна обробка приповерхневих шарів більшості досліджуваних матеріалів (65Г, ТЛ5, ВТ8, ВТ10) шкідливо впливає на характеристики втоми за суттєвих величин діючих навантажень. Це обумовлено зміною структури шарів, а також значними полями залишкових напружень і більш інтенсивнішим окисленням граней мікротріщин пустот, раковин з одночасним існуванням декількох фаз металів, складним розподілом легуючих елементів, що є особливо характерним для «складних» матеріалів.

3. Комбінована обробка поверхні матеріалів фізичними полями лазерно-акустичного та лазерно-радіаційного опромінювання дає змогу за рахунок зміни структурних характеристик для однорідних матеріалів в усьому діапазоні повторно-змінних напружень (ТЛ5), а для сплавів (65Г, ВТ8, ВТ10) — в зоні напружень близьких до границі втоми, суттєво підвищити їх витривалість, зносостійкість і корозійну стійкість.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sumanth Ratna Kandavalli, Gadudasu Babu Rao, Praveen Kumar Bannaravuri, Manu Mathai Kanakamani Rajam, Sunanda Ratna Kandavalli, S. Rajesh Ruban. (2021). Surface strengthening of aluminium alloys/composites by laser applications: A comprehensive review. *Materials Today Proceedings*, 47(19), 6919—6925.
2. K. Y. Luo, J. Z. Lu, Y. K. Zhang, J. Z. Zhou, L. F. Zhang, F. Z. Dai, L. Zhang, J. W. Zhong, C. Y. Cui. (2011). *Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI 304 austenitic stainless steel*: materials Science and Engineering: A, 528(13—14), 25 May, 4783—4788.
3. Мудрий, С. І., Никируй, Ю. С. (2017). *Вплив лазерного опромінювання на структуру аморфних металевих сплавів*. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.
4. Nikola Kalentic, Eric Boillat, Patrice Peyre, Snežana Ćirić-Kostić, Nebojša Bogojević, Roland E. (2017). Logé Tailoring residual stress profile of Selective Laser Melted parts by Laser Shock Peening. *Additive Manufaturin*, 16, 90—97.
5. Мажейка, О. Й. (2011). *Лазерна, плазмова і детонаційна технології зміцнення поверхонь*: монографія. Кіровоград: видавництво Лисенко В. Ф. ISBN 966-2570-12-0.
6. Pengjie, Wang, Qiang, Cao, Sheng, Liu, Qing, Peng. Surface strengthening of stainless steels by nondestructive laser peening. (2012). *Materials & Design*, 205, 109754.
7. Гончарук, О. О., Головка, Л. Ф., Кагляк, О. Д., Лутай, А. М. (2012). Визначення оптимальних умов лазерного формування інструментального шару абразивних інструментів: *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5(60)), 28—31.
8. Башта, А. В., Леонець, В. А., Горик, О. В. (1996). Вплив лазерно-радіаційних полів на характеристики міцності сплаву ВТ8: *тези доповідей 48-ї Наукової конференції викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського інженерно-будівельного університету*, частина 3, 86.
9. Башта, А. В., Леонець, В. А. (1998). Лазерно-акустичне опромінення зразків і його вплив на характеристики міцності металів: *тези доповідей 50-ї наукової конференції викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського державного технічного університету*, частина 3, 179.
10. Lyashenko, B. A., Solovyh, V. G., Kaplun, B. A., i dr. (2009). Tehnologicheskoe obespechenie diskretnoj struktury poverhnosti pri azotirovanii. *Tehnologicheskie sistemy*, 2, 55—59.